УДК 544.52

ФОТОЛИЗ СИСТЕМ АЗИД СЕРЕБРА – МЕДЬ

Э.П. Суровой, С.М. Сирик, Л.Н. Бугерко

ГОУ ВПО «Кемеровский государственный университет»
E-mail: epsur@kemsu.ru

Масс-спектрометрическим и спектрофотометрическим методами исследованы кинетические и спектральные закономерности формирования продуктов фотолиза систем $AgN_3(A_1)$ – Cu в зависимости от интенсивности падающего света ($2,8\cdot10^{14}...3,17\cdot10^{15}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$) при λ=365 нм и времени экспонирования. Создание систем $AgN_3(A_1)$ – Cu, предварительная обработка их светом λ=365 нм наряду с увеличением скорости фотолиза и фототока в области собственного поглощения $AgN_3(A_1)$ приводит к расширению области спектральной чувствительности азида серебра. Предложена модель фотолиза систем $AgN_3(A_1)$ – Cu, включающая генерацию, рекомбинацию и перераспределение в контактном поле электрон-дырочных пар, формирование микрогетерогенных систем азид серебра – серебро (продукт фотолиза) и образование азота. Показано, что диффузия подвижного иона серебра к нейтральному центру лимитирует процесс фотолиза систем $AgN_3(A_1)$ – Cu. Рассчитаны удельная скорость, скорость и константа скорости фотолиза.

Решение задач направленного регулирования фотохимической и фотоэлектрической чувствительности неорганических солей представляет для физики и химии твердого тела многосторонний интерес [1–6]. Постановка подобных исследований, наряду с их технической актуальностью [3, 4, 6], может быть полезным инструментом для выяснения механизма процесса разложения твердых тел [1, 2, 4, 5]. Среди разнообразных светочувствительных соединений особое место занимают азиды тяжелых металлов (АТМ) [7]. Относительно несложный состав и структура, высокая фоточувствительность, значительный внутренний фотоэффект, простой состав конечных продуктов фотолиза делают АТМ удобными модельными объектами исследований [8, 9]. Ранее [10] было установлено, что создание контактов азида серебра с полупроводниками, наряду с увеличением скорости фотолиза и фототока в области собственного поглощения азида серебра, приводит к расширению области спектральной чувствительности.

В настоящем сообщении приведены результаты цикла работ, направленного на исследование кинетических и спектральных закономерностей фотолиза систем $AgN_3(A_1)$ – Cu до, в процессе и после предварительного разложения и выяснение причин, вызывающих наблюдаемые изменения медью фотохимической и фотоэлектрической чувствительности азида серебра.

Объекты и методы исследования

Азид серебра марки А1 ($AgN_3(A_1)$) синтезировали методом двухструйной кристаллизации, одновременно сливая водные 0,2 н растворы дважды перекристаллизованного технического азида натрия и нитрата серебра (марки хч) при pH 3, T=293 K. $AgN_3(A_1)$ прессовали в таблетки массой 150 мг при давлении $4\cdot10^3$ кг·см$^{-2}$. Системы готовили: 1) перемешиванием дозированных количеств азида серебра и меди (Cu) в сухом состоянии и в этиловом спирте, с последующей сушкой и прессованием таблеток при давлении $4\cdot10^3$ кг·см$^{-2}$, 2) нанесением Cu на таблетки азида серебра методом термического испарения при давлении $1\cdot10^{-4}$ Па, используя вакуумный универсальный пост (ВУП-5М). Толщина слоев кадмия варьировалась в пределах 500...1500 Å. При сопоставлении результатов и построении кривых спектрального распределения скорости фотолиза ($V_ф$) и фототока ($i_ф$) пропускание света через Cu учитывалось.

Измерения кинетических кривых $V_ф$ и $i_ф$ образцов проводили при давлении $1\cdot10^{-5}$ Па. В качестве датчика при измерении $V_ф$ использовали лампу РМО-4С омегатронного масс-спектрометра ИПДО-1, настроенного на частоту регистрации азота. Измерения $i_ф$ проводили на установке, включающей электрометрический вольтметр В7–30 либо электрометр ТР-1501 [11]. Спектры диффузного отражения (ДО) до и после

облучения образцов измеряли при давлении $1\cdot10^{-4}$ Па [10], используя специально сконструированное устройство [12], на спектрофотометре СФ-4А с приставкой ПДО-1, и при давлении 101,3 кПа на спектрофотометрах СФ-10 и SPECORD-M40 с приставкой на отражение 8°d. В качестве источника света применяли ртутную (ДРТ-250) и ксеноновую (ДКсШ-1000) лампы. Для выделения требуемого спектрального диапазона излучения использовали монохроматор SPM-2 и набор светофильтров. Актинометрию источников света проводили, используя радиационный термоэлемент РТ-0589. Контактную разность потенциалов (КРП) между азидом серебра, Cu и относительным платиновым электродом измеряли, используя модифицированный метод Кельвина [13].

Результаты и обсуждение

При исследовании кинетических закономерностей фотолиза и фототока $AgN_3(A_1)$ и систем $AgN_3(A_1)$ – Cu в зависимости от интенсивности ($2{,}8\cdot10^{14}...3{,}17\cdot10^{15}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$) и спектрального состава падающего света (λ=300...1500 нм) было установлено, что кинетические кривые $V_ф$ и $i_ф$ коррелируют (рис. 1).

Создание контактов $AgN_3(A_1)$ с Cu приводит к увеличению $V_ф$ и $i_ф$ азида серебра. При экспонировании образцов светом λ=365 нм в интервале интенсивностей от $2{,}8\cdot10^{14}$ до $3{,}17\cdot10^{15}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$ реализуются кривые, состоящие из пяти участков: I – начального (с максимумом), II – стационарного, III – ускорения, IV – насыщения, V – темнового постгазовыделения. Предварительный прогрев систем $AgN_3(A_1)$ – Cu при давлении $P=1\cdot10^{-5}$ Па, продолжительное хранение образцов в атмосферных условиях, засветка рассеянным белым светом приводят к уменьшению максимума на кинетических кривых $V_ф$ и $i_ф$. Повторное (после прерывания света на I и II участках) освещение образцов не приводит к заметному изменению $V_ф$ и $i_ф$ на II, III, IV участках кинетических кривых $V_ф$ и $i_ф$ (рис. 1), при этом значения $V_ф$ и $i_ф$ на участке I уменьшаются (рис. 1, кривая 3). Предварительное экспонирование образцов в течение времени достижения участка IV приводит к монотонному увеличению $V_ф$ и $i_ф$ до постоянных значений (рис. 1, кривая 4). Хранение в течение 12 ч и более при давлении $1\cdot10^{-1}$ Па предварительно экспонированных образцов приводит к частичному восстановлению формы кривой (максимум на участке I не восстанавливается). Кривые темнового постгазовыделения спрямляются в координатах $\ln C_{N_2}=f(\tau)$. По тангенсу угла наклона зависимости $\ln C_{N_2}=f(\tau)$ оценили значения констант скорости (k) после прерывания освещения на разных участках кинетических кривых $V_ф$ (табл. 1).

Таблица 1. *Константы скорости постгазовыделения*

Образец	Константа k, с$^{-1}$		
	Участок I	Участок II	Участок III
$AgN_3(A_1)$–Cu	$(1{,}30\pm0{,}04)\cdot10^{-2}$	$(1{,}42\pm0{,}05)\cdot10^{-2}$	$(1{,}19\pm0{,}04)\cdot10^{-3}$
$AgN_3(A_1)$	$(1{,}20\pm0{,}05)\cdot10^{-2}$	$(1{,}28\pm0{,}05)\cdot10^{-2}$	$(1{,}30\pm0{,}05)\cdot10^{-3}$

Закономерности формирования твердофазного продукта фотолиза систем $AgN_3(A_1)$ – Cu изучали путем измерений ДО образцов в процессе обработки их светом из области собственного поглощения азида серебра в интервале интенсивностей падающего света ($2{,}8\cdot10^{14}...3{,}17\cdot10^{15}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$). Было

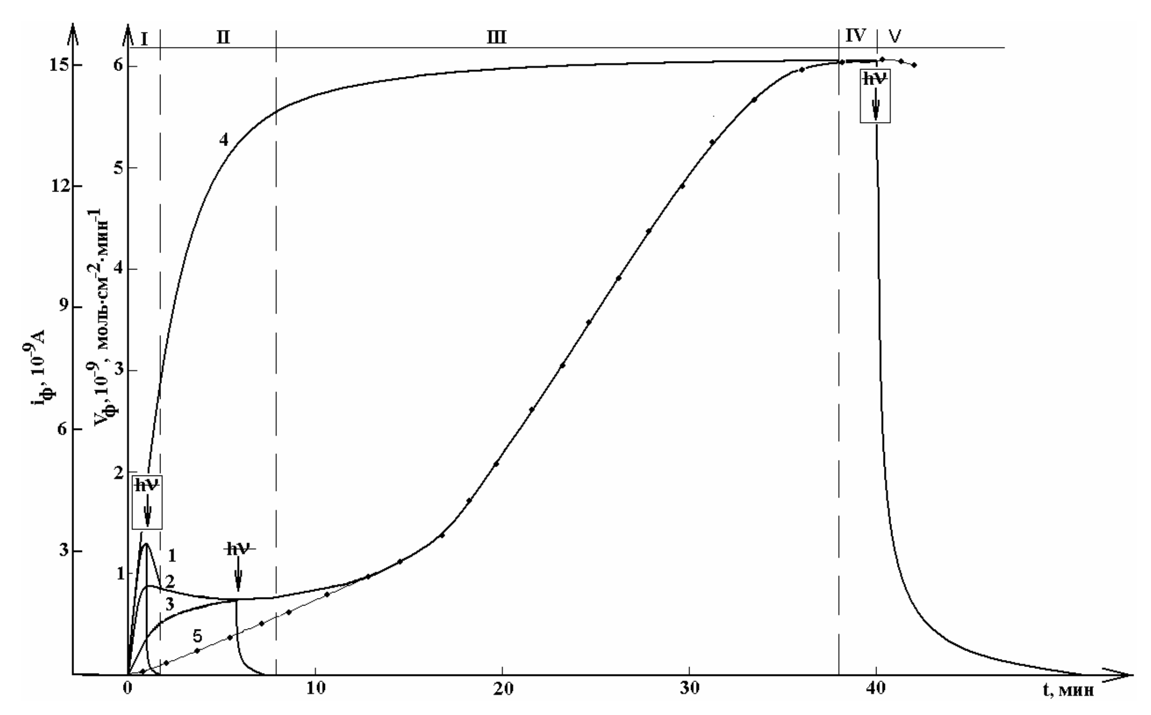


Рис. 1. *Кинетические кривые скорости фотолиза и фототока систем $AgN_3(A1)$ – Cu до (1) и после прерывания света на I (2), II (3), IV (4) участках, рассчитанная кривая $V_ф$ (5) при λ=365 нм, $I=3.17\cdot10^{15}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$. Стрелками обозначены моменты выключения света*

установлено, что формирование систем $AgN_3(A_1)$ – Cu приводит к уменьшению ДО по сравнению с индивидуальным азидом серебра в области λ=400...900 нм. Длинноволновый край ДО систем $AgN_3(A_1)$ – Cu совпадает с измеренным для индивидуального азида (λ=365 нм).

Обработка образцов $AgN_3(A_1)$ – Cu светом из области собственного поглощения азида серебра приводит к существенным изменениям спектральных кривых ДО. При временах облучения образцов, соответствующих временам реализации нестационарного (I) и стационарного (II) участков кинетических кривых $V_ф$ и $i_ф$, наряду с уменьшением ДО диапазоне 400...900 нм на спектральных кривых ДО систем $AgN_3(A_1)$ – Cu (также как и для азида серебра [15]) появляются максимумы при λ=440 и 600 нм. Дальнейшее увеличение времени световой обработки до участка возрастания $V_ф$ и $i_ф$ (III) приводит к уширению полос и смещению максимумов в длинноволновую область спектра. При временах освещения, соответствующих достижению участка (IV) на кривых $V_ф$ и $i_ф$, заметных изменений в спектрах ДО не наблюдается. Хранение облученных образцов в течение 24 ч при 293 K и P=101,3 кПа приводит к частичному восстановлению ДО образцов в длинноволновой области спектра. Было установлено [14], что изменения в спектрах ДО $AgN_3(A_1)$ связаны с образованием фотолитического серебра, а широкие полосы с максимумами при λ=420 и 600 нм – с образованием частиц серебра со средним размером d=40 и 100 Å. На рис. 2 представлены результаты сопоставления кинетических зависимостей изменения концентрации фотолитического металла ($C_{ме}$), рассчитанные по результатам измерений кинетических кривых $V_ф$ при различных интенсивностях падающего света, со значениями площадей (S), соответствующих изменению диффузного отражения систем $AgN_3(A_1)$ – Cu в процессе облучения. Совпадения зависимостей, а также результаты работ [9, 14] свидетельствуют о том, что наблюдаемые в результате облучения образцов изменения на спектральных кривых диффузного отражения систем $AgN_3(A_1)$ – Cu обусловлены образованием серебра – продукта фотолиза азида серебра, а максимумы – формированием частиц серебра соответствующих размеров. Твердофазный (серебро) и газообразный (азот) продукты фотолиза систем $AgN_3(A_1)$ – Cu образуются в стехиометрическом соотношении, в основном, на поверхности образцов.

В табл. 2 приведены константы $V_ф AgN_3(A_1)$ и систем $AgN_3(A_1)$ – Cu, оцененные по тангенсу угла наклона зависимостей $\ln S=f(\tau)$, $\ln C_{ме}=f(\tau)$.

Таблица 2. *Константы скорости фотолиза систем $AgN_3(A_1)$ – Cu, рассчитанные по кинетическим кривым скорости фотолиза ($k_ф$) и спектрам диффузного отражения ($k_{ДО}$), при $I=3,17\cdot10^{15}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$*

Образец	$k_ф$, с$^{-1}$	$k_{ДО}$, с$^{-1}$
$AgN_3(A_1)$ – Cu	$(2,20\pm0,15)\cdot10^{-2}$	$(2,40\pm0,18)\cdot10^{-2}$
$AgN_3(A_1)$	$(4,50\pm0,35)\cdot10^{-2}$	$(4,8\pm0,50)\cdot10^{-2}$

Из табл. 2 видно, что константы скорости фотолиза азида серебра и систем $AgN_3(A_1)$ – Cu удовлетворительно совпадают. На рис. 3 приведены кривые спектрального распределения $V_ф$ и $i_ф$, построенные по стационарным значениям $V_ф$ и $i_ф$ (участок II кинетических кривых $V_ф$ и $i_ф$). Видно, что создание систем $AgN_3(A_1)$ – Cu наряду с увеличением $V_ф$ и $i_ф$ в собственной области поглощения азида сере-

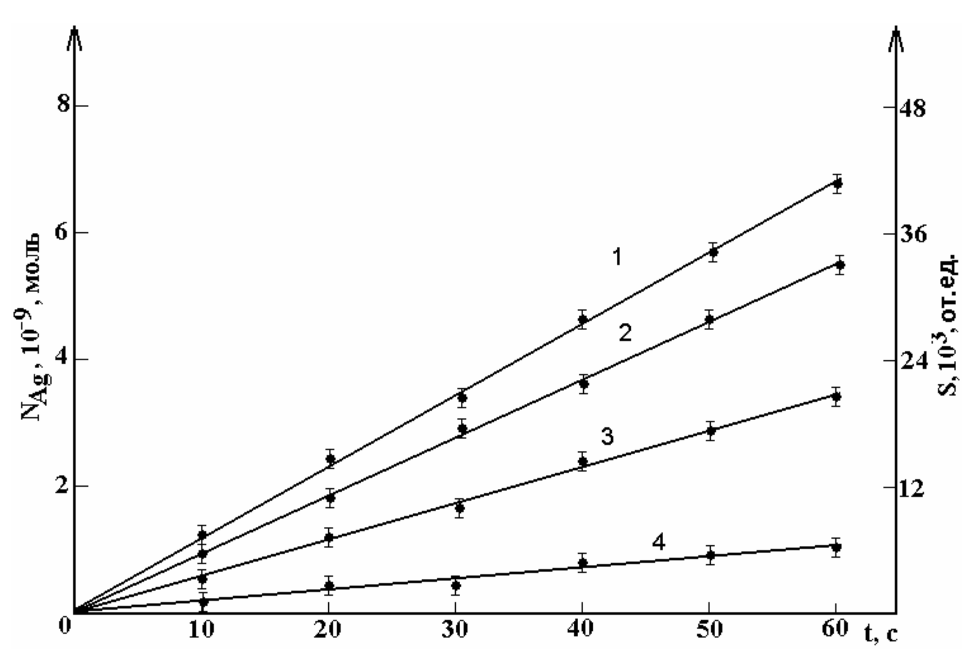


Рис. 2. *Зависимость количества фотолитического серебра (N_{Ag}) и площадей (S), соответствующих изменению диффузного отражения образцов $AgN_3(A_1)$ – Cu, от интенсивности падающего света I, квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$: 1 – $3,7\cdot10^{15}$, 2 – $2,6\cdot10^{15}$, 3 – $1,6\cdot10^{15}$, 4 – $2,8\cdot10^{14}$, при λ=365 нм*

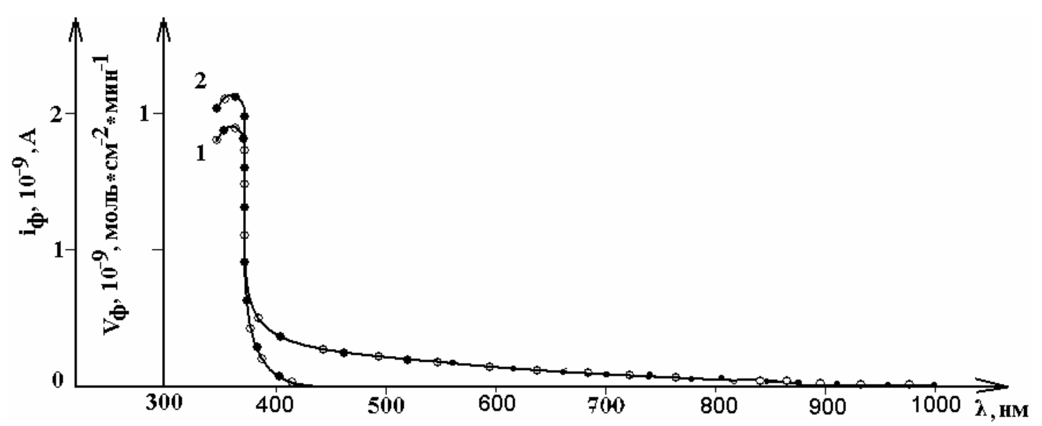


Рис. 3. *Спектральные распределения скорости фотолиза и фототока $AgN_3(A_I)$ (1) и систем $AgN_3(A_I)$ – Cu (2), $I=3,17 \cdot 10^{15}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$*

бра приводит к расширению области спектральной чувствительности $AgN_3(A_I)$. Для выяснения энергетического строения контактов азида серебра с Cu и причин, вызывающих наблюдаемые изменения медью $V_ф$ и $i_ф$ азида серебра в разных спектральных областях, были выполнены измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) и КРП между азидом серебра, Cu и относительным платиновым электродом. Из анализа ВАХ и результатов измерений контактной разности потенциалов (табл. 3) было установлено, что в области контакта $AgN_3(A_I)$ – Cu возникает потенциальный барьер. Контакт $AgN_3(A_I)$ – Cu проявляет выпрямляющие свойства (прямому направлению соответствует внешнее напряжение, приложенное в направлении противоположном контактной разности потенциалов – плюс источника подан со стороны $AgN_3(A_I)$).

Таблица 3. *Контактная разность потенциалов между $AgN_3(A_I)$, Cu и относительным платиновым электродом*

Образец	КРП, В (*T*=293 К)	
	P=$1 \cdot 10^5$ Па	*P*=$1 \cdot 10^{-5}$ Па
$AgN_3(A_I)$	+0,54	+0,52
Cu	+0,07	+0,08

Полученные в настоящей работе и ранее [8–10, 14] результаты исследований свидетельствуют о том, что фотохимические проявления фотоэлектрических процессов в системах $AgN_3(A_I)$ – Cu могут быть вызваны:

1. фотоэмиссией электронов (дырок) из металла в азид серебра;
2. перераспределением под действием контактного поля генерированных в $AgN_3(A_I)$ светом неравновесных электрон-дырочных пар;
3. компенсирующими потоками равновесных носителей заряда.

Эти процессы приводят к тому, что добавка металла может выступать в качестве донора или акцептора электронов.

Диаграмма энергетических зон систем $AgN_3(A_I)$ – Cu, при построении которой использовали результаты исследований спектрального распределения $V_ф$ и $i_ф$ (рис. 3), контактной разности потенциалов [13] (табл. 3), внешней фотоэмиссии из азида серебра [15], спектров диффузного отражения $AgN_3(A_I)$ [14] и $AgN_3(A_I)$ – Cu, приведена на рис. 4. При воздействии на системы $AgN_3(A_I)$ – Cu света из области собственного поглощения азида серебра имеет место интенсивная генерация неравновесных носителей заряда а азиде серебра (переход 1)

$$N_3^- \to p + e$$

и фотоэмиссия дырок из металла в валентную зону азида серебра (переход 2). Генерированные в области пространственного заряда $AgN_3(A_I)$ пары носителей перераспределяются в контактном поле, обусловленном несоответствием работ выхода электронов из контактирующих партнеров и наличием собственных поверхностных электронных состояний (СПЭС) [13], с переходом электронов на уровни СПЭС ($T_п^+$) или непосредственно в металл (переходы 3, 4)

$$T_п^+ + e \to T_п^о,$$
$$M^+ + e \to M^о.$$

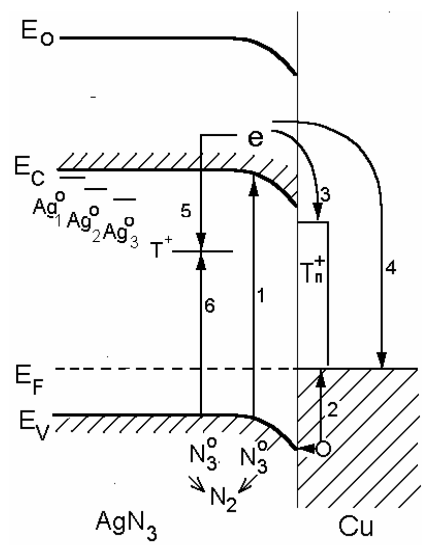


Рис. 4. *Диаграмма энергетических зон систем $AgN_3(A_I)$ – Cu, E_V – уровень потолка валентной зоны, E_C – уровень дна зоны проводимости, E_f – уровень Ферми, E_0 – уровень вакуума, T – центр рекомбинации*

Так как квантовый выход фотолиза, оцененный по начальному участку кинетической кривой $V_ф$, составляет ≈0,002...0,01, то часть фотоиндуцируемых носителей заряда рекомбинирует (переходы 5, 6)

$$T^+ + e \to T^o,$$
$$T^o + p \to T^+,$$

где T^+ – центр рекомбинации. Концентрация дырок в области пространственного заряда азида серебра по сравнению с концентрацией их в индивидуальном азиде будет возрастать. Возрастание концентрации дырок в области пространственного азида серебра приводит к соответствующему увеличению $i_ф$ и $V_ф$ по принимаемым для фотолиза АТМ реакциям образования азота:

$$p + V_к^- \to V_к^o,$$
$$p + V_к^o \to V_к^+,$$
$$V_к^+ \to 3N_2 + 2\,V_а^+ + V_к^-,$$

где $V_а^+$ и $V_к^-$ – анионная и катионная вакансии.

При фотолизе систем $AgN_3(A_I)$ – Cu одновременно с выделением азота образуется и фотолитическое серебро. Формирование частиц фотолитического серебра, по нашему мнению, происходит с участием СПЭС

$$T_п^o + Ag^+ \to (T_пAg)^+ + e \to ... \to (T_пAg_m)^+.$$

Наблюдаемое уменьшение $V_ф$ и $i_ф$ на начальном участке (I) кинетических кривых в процессе и после экспонирования образцов (рис. 1) подтверждает необратимый расход поверхностных центров. В процессе роста частиц фотолитического металла формируются микрогетерогенные системы азид серебра – серебро (продукт фотолиза). Генерированные в области пространственного заряда азида серебра пары носителей перераспределяются в контактном поле, сформированном из-за несоответствия между термоэлектронными работами выхода азида серебра и фотолитического серебра, с переходом неравновесных электронов из зоны проводимости $AgN_3(A_I)$ в металл

$$(T_пAg_m)^+ + e \to (T_пAg_m)^o.$$

Одновременно имеет место фотоэмиссия дырок из фотолитического серебра в азид серебра (переход 2). Эти процессы, во-первых, приводят к возрастанию концентрации дырок и, как следствие, к увеличению $V_ф$ и $i_ф$ (участок III); во-вторых, могут стимулировать диффузию ионов серебра к растущим частицам

$$(T_пAg_m)^o + Ag^+ \to (T_пAg_{m+1})^+.$$

Для определения лимитирующей стадии процесса роста частиц серебра оценили время, в течение которого подвижный ион Ag^+ диффундирует к нейтральному центру $(T_пAg_m)^o$.

Среднее время релаксации при диффузионном протекании процесса может быть оценено [16]

$$\tau_n = e^2/\sigma akT,$$

где: e – заряд электрона, a – постоянная решетки $AgN_3(A_I)$, $5{,}6\cdot10^{-8}$ см, σ – удельная проводимость $AgN_3(A_I)$. При T=293 К $\sigma=1\cdot10^{-12}$ Ом$^{-1}\cdot$см$^{-1}$ [17], k – постоянная Больцмана, T – температура.

При T=293 К $\tau_n \approx 1{,}14\cdot10^2$ с, константа скорости диффузии Ag^+ к нейтральному центру $(T_пAg_m)^o$ $k_1 \approx 1/1{,}14\cdot10^2 \approx 8{,}8\cdot10^{-3}$ с$^{-1}$.

При условии, что концентрация центров роста $(T_п^+)$ и скорость роста частиц серебра постоянная, зависимость скорости реакции от времени экспонирования, согласно [18], описывается уравнением:

$$w = \chi\tau^2 - 2\chi\tau \times$$
$$\times \left\{ \begin{aligned} &(\sigma/\sqrt{2\pi})\exp[-(\tau-a)^2/2\sigma^2] - (\sigma/\sqrt{2\pi})\exp(-/2\sigma^2) \\ &+[(\tau-a)/\sigma\sqrt{2\pi}]\int_0^\tau \exp[-(\tau-a)^2/2\sigma^2]d\tau \end{aligned} \right\},$$

где $\chi = 2\pi(M^2/d^2)W_{уд}^3N$, M – молярная масса серебра, d – эффективная плотность серебра, $W_{уд}$ – удельная скорость реакции, N – количество частиц серебра, a – время, при котором скорость касания растущих ядер максимальна, σ – рассеяние случайных величин вокруг ее математического ожидания. Чем меньше σ, тем больше ядер соприкасается друг к другу к моменту времени $\tau = a$ и тем более равномерно распределены они на поверхности. Первый член правой части уравнения выражает скорость реакции при независимом росте ядер, а остальные – поправку, связанную с перекрыванием ядер. Параметр χ предварительно определяли из данных для начального участка кинетической кривой (рис. 1, кривая 1) [18]:

$$n_a = \int_0^a w d\tau = \frac{1}{3}\chi a^3,$$

где n_a – количество превращенного вещества. Параметр a и σ определяли, сопоставляя кинетическую кривую $V_ф$ (рис. 1) с калибровочными кривыми, построенными при различных значениях a и y по ур. (1). Получили, что при $\chi = 1{,}1\cdot10^{-11}$ моль·мин$^{-3}$ a=21 мин и σ=13. Согласно [18], удельная скорость образования частиц серебра

$$W_{уд} = 2\chi a^2/\pi g S_{уд},$$

где $S_{уд}$ – удельная поверхность азида серебра, равная $6\cdot10^6$ см$^2\cdot$моль$^{-1}$ [19], g – навеска исходного образца.

Поскольку коэффициент поглощения для азида серебра при λ=365 нм составляет ~10^5 [20], то процесс фотолиза протекает на глубине до 10^{-5} см, возможно вместо значения g, использовать $g_1 = 5\cdot10^{-7}$ моль, рассчитанное из кривой полного разложения азида серебра. При g_1 получили, что $W_{уд} = 1{,}26\cdot10^{-9}$ моль·с$^{-1}$.

Рассчитанная кривая скорости образования частиц серебра представлена на рис. 1 (кривая 5). По тангенсу угла наклона зависимости $\ln C_{Ag} = f(\tau)$, где C_{Ag} – концентрация фотолитического серебра, оценили константу скорости роста частиц фотолитического серебра ($k_2 = 5{,}3\cdot10^{-3}$ с$^{-1}$). Константа скорости k_2 удовлетворительно согласуется с рассчитанной константой скорости диффузии иона серебра Ag^+ к растущей частице серебра (k_1) и с константами скорости темнового постгазовыделения (k) (табл. 1) и фотолиза ($k_ф$) (табл. 2), определенными из экспериментальных данных. Совпадение значений $k_ф$, k, k_1, k_2 дают основание предположить, что лимитирую-

щей стадией фотолиза и темнового постгазовыделения для систем $AgN_3(A_1)$ – Cu является диффузия ионов серебра к нейтральному центру $(T_пAg_m)^o$. В процессе фотолиза граница раздела контактов азид серебра – медь покрывается слоем фотолитического серебра, и при больших степенях превращения фотоэлектрические процессы в системах $AgN_3(A_1)$ – Cu будут в значительной степени определяться фотоэлектрическими процессами на границе азид серебра – серебро (продукт фотолиза) – медь.

Работа поддержана грантом Президента РФ для поддержки ведущих научных школ НШ – 20.2003.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robbilard J.J. Possible use of certain metallic azides for the development of dry photographic process // J. Photog. Science. – 1971. – V. 19. – P. 25–37.
2. Levy B., Lindsey M. Semiconductor sensitization of photosensitive materials. Part II. Spectral sensitization silver halides with PbO – photographic diode // Phot. Sci. and Eng. – 1973. – V. 17. – № 2. – P. 135–141.
3. Акимов И.А., Черкасов Ю.А., Черкашин М.И. Сенсибилизированный фотоэффект.– М.: Наука, 1980. – 384 с.
4. Горяев М.А., Пименов Ю.Д. Управление процессами формирования изображения в неорганических светочувствительных материалах // Успехи научной фотографии. – 1980. – Т. 20. – С. 96–105.
5. Индутный И.З., Костышин М.Т., Касярум О.П., Минько В.И., Михайловская Е.В., Романенко П.Ф. Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл – полупроводник. – Киев: Наукова думка, 1992. – 240 с.
6. Шапиро Б.И. Теоретические начала фотографического процесса. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 288 с.
7. Боуден Ф., Иоффе А. Быстрые реакции в твердых веществах. – М.: Иностранная литература, 1962. – 243 с.
8. Суровой Э.П., Бугерко Л.Н., Расматова С.В. Фотолиз гетеросистем «азид свинца – кадмий» // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 95–99.
9. Суровой Э.П., Бугерко Л.Н., Расматова С.В. Фотолиз систем «азид свинца – теллурид кадмия» // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 4. – С. 85–88.
10. Суровой Э.П., Сирик С.М., Захаров Ю.А., Бугерко Л.Н. Фотолиз гетеросистем азид серебра – оксид меди (I) // Журн. науч. и прикл. фотографии. – 2002. – Т. 47. – № 5. – С. 19–27.
11. Суровой Э.П., Бугерко Л.Н., Захаров Ю.А., Расматова С.В. Закономерности формирования твердофазного продукта фотолиза гетеросистем азид свинца – металл // Материаловедение. – 2002. – № 9. – С. 27–33.
12. А.с. 1325332 СССР. МКИ G01N 21/55. Устройство для измерения спектров отражения в вакууме / А.И. Турова, Г.П. Адушев, Э.П. Суровой и др. Заявлено 10.11.1985; Опубл. 24.07.1987, Бюл. № 27. – 5 с.: ил.
13. Суровой Э.П., Захаров Ю.А., Бугерко Л.Н. Определение работы выхода электрона из азидов серебра, свинца и таллия // Неорганические материалы. – 1996. – Т. 32. – № 2. – С. 162–164.
14. Суровой Э.П., Бугерко Л.Н., Сирик С.М. Закономерности образования твердофазного продукта фотолиза азида серебра // Химическая физика. – 2000. – Т. 19. – № 10. – С. 68–71.
15. Захаров Ю.А., Колесников Л.В., Черкашин А.Е., Кащеев С.В. Исследование методом внешней фотоэмиссии электронной структуры азида серебра // Известия вузов. Сер. Физика. – 1975. – № 6. – С. 44–50.
16. Мейкляр П.В. Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения. – М.: Наука. 1972. – 399 с.
17. Гасьмаев В.К. Исследование механизма термического разложения азида серебра электрофизическими методами: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Томск, 1973. – 19 с.
18. Розовский А.Я. Гетерогенные химические реакции. Кинетика и механизм. – М.: Наука, 1980. – 264 с.
19. Савельев Г.Г., Захаров Ю.А., Гаврищенко Ю.В. Фотолиз азидов тяжелых металлов и его оптическая сенсибилизация // Журн. науч. и прикладной фото- кинематографии. – 1969. – Т. 14. – № 6. – С. 466–468.
20. Диамант Г.М. Неравновесная проводимость в процессе фотохимической реакции в азиде серебра: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Кемерово, 1986. – 22 с.